

A DEFLECTOMETRIA COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE ESTRUTURAL EM PAVIMENTO RECONSTRUÍDO

Renata de Souza Sales
Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

RESUMO

O modo rodoviário concentra grande parte da matriz de transportes no Brasil, o que proporciona maiores solicitações à infraestrutura e favorece a manifestação precoce de defeitos. Visto que o levantamento da deflectometria proporciona a análise estrutural de um pavimento, este artigo tem como objetivo o estudo de um trecho de rodovia que passou por intervenção em sua estrutura, de maneira a comparar os dados deflectométricos obtidos pelo *Falling Weight Deflectometer* (FWD) antes e depois da intervenção de solução única. Foram analisadas as deflexões de projeto e os raios de curvatura da bacia deflectométrica de duas faixas de tráfego em dois sentidos diferentes com medições em 2016 e 2019. Observou-se que em 2016 o pavimento possuía 95% das deflexões superiores à admissível, de maneira que a faixa externa apresentou piores condições. Em 2019 a mesma faixa mostrou menor potencial de resistência à fadiga, mesmo após sua reconstrução.

ABSTRACT

The road mode concentrates a large part of the transportation matrix in Brazil, which provides greater demands on the infrastructure and improves the early manifestation of defects. Since the deflectometry study provides the structural analysis of pavements, this article aims to study a stretch of road that underwent intervention in its structure to compare the deflectometry data obtained by the Falling Weight Deflectometer (FWD) before and after the single solution intervention. The project deflections and the radius of curvature of the deflection basin in two traffic lanes in two different directions were analyzed with measurements in 2016 and 2019. It was observed that in 2016 the pavement had 95% of the deflections higher than permitted so that the external lane had worse conditions. In 2019, the same lane showed less potential for fatigue resistance, even after its reconstruction.

1. INTRODUÇÃO

A solicitação contínua do pavimento por veículos e clima proporciona o aparecimento de defeitos ao longo do tempo e uma deficiente gestão rodoviária leva ao surgimento precoce dessas deformidades. Para garantir a serventia do pavimento, é necessário um gerenciamento que proporcione decisões coerentes com a necessidade de manutenções e reabilitações. A grande demanda pelo modo rodoviário de transporte no Brasil leva a uma preocupação quanto às ações efetivas da Engenharia de Transportes que possibilitem que esses deslocamentos ocorram de forma segura e agradável. A CNT (2019) mostrou que 41,8% das rodovias federais analisadas tem seu pavimento classificado como regular, ruim ou péssimo; esse número sobe para 69,4% quando se trata de rodovias estaduais.

Segundo Marecos *et al.* (2017), o planejamento e otimização das atividades de manutenção e reabilitação de pavimentos pode ser fundamentado na avaliação contínua da sua condição estrutural. Métodos não-destrutíveis são preferíveis quando se tratam de análises a longo prazo, visto que os métodos destrutíveis tradicionais são inseguros e caros. O DNIT (2006) indica que as deflexões recuperáveis de um pavimento são os principais dados que possibilitam a avaliação estrutural em um pavimento flexível. Esse tipo de deflexão proporciona a flexão das diferentes camadas de um pavimento, de forma contínua elas ocasionam a fadiga das camadas do pavimento, que é detectada por meio de trincas em sua superfície.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar a intervenção realizada em um trecho de rodovia brasileira, com dados deflectométricos obtidos por meio do *Falling Weight*

Deflectometer (FWD). O estudo foi realizado com dados de 2016, antes da intervenção, e 2019, depois da intervenção, de forma que fosse possível a comparação da capacidade estrutural.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A avaliação estrutural de um pavimento está ligada à capacidade de carga estabelecida por meio do projeto e dimensionamento. Ao ter seu limite atingido, o pavimento poderá apresentar ruptura, o que não ocorre de maneira repentina, mas sim ao longo de sua vida. Os defeitos relacionados a estrutura do pavimento ocorrem devido à repetição das cargas e estão diretamente ligados às deformações elásticas (ou recuperáveis) e plásticas (ou permanentes). As trincas existentes em um pavimento são causadas, em sua maioria, pelo acúmulo de deformações que quando não tratadas podem levar à fadiga do pavimento. (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Espíndola *et al.* (2017) realizaram um levantamento das rodovias federais do estado de Alagoas a fim de diagnosticar a condição do pavimento. A avaliação foi efetuada utilizando-se dados do Índice de Condição da Superfície (ICS), quantidade de panelas, irregularidade longitudinal (IRI), afundamentos na trilha de roda e trincamento. Por meio do estudo foi possível concluir que os problemas mais graves das rodovias estavam relacionados a afundamentos na trilha de roda, associados à condição estrutural do pavimento que representam o acúmulo das deformações permanentes.

Segundo Bernucci *et al.* (2010) os métodos não-destrutivos são os mais adequados quando se trata de avaliações estruturais a serem realizadas em grandes extensões de pavimentos, que possibilitem repetições diversas em um mesmo ponto e que permitam o acompanhamento da variação da capacidade de carga no decorrer do tempo. Os equipamentos que permitem as medidas de deflexão de maneira automatizada por meio da queda de um peso suspenso, como o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), são os que permitem melhor acurácia das medições, visto que não há influência do operador na determinação de valores como a temperatura, que são feitas de forma automática, o que possibilita a correção dos resultados de acordo com a temperatura do momento da medição. Além disso, também é possível utilizar diferentes níveis de carga na medida das deflexões.

Xu *et al.* (2002) utilizaram o FWD, por ser um meio barato e com grande produtividade na realização das medições em campo, com o objetivo de estabelecer novas relações entre deflexões e indicadores de um pavimento asfáltico que possibilitem a avaliação estrutural. Desse modo, foi realizado um estudo da sensibilidade dos parâmetros das bacias de deflexões para as diferentes camadas de um pavimento por meio de um banco de dados sintético considerando o efeito dinâmico do FWD e o comportamento não linear das camadas do pavimento. O estudo apontou o parâmetro crítico da bacia de deflexões para cada camada e concluiu que a obtenção dos resultados foi feita em tempo insignificante, o que mostrou a eficácia do procedimento, possibilitando sua realização em campo.

Noureldin *et al.* (2003) realizaram a avaliação estrutural de um pavimento a nível de rede utilizando o FWD e o *Ground Penetrating Radar* (GPR) em rodovias interestaduais no estado de Indiana nos Estados Unidos. A análise mostrou que o estudo a nível de rede empregando esses equipamentos é válido e capaz de fornecer uma forte linha de base da capacidade estrutural de um pavimento e que as informações obtidas podem ser utilizadas para projeto, reabilitação e manutenção de pavimentos.

No que diz respeito às deflexões recuperáveis, DNER (1979) estabelece os procedimentos a serem seguidos na obtenção das deflexões características e deflexões admissíveis do pavimento, bem como o raio de curvatura da bacia de deformações. A avaliação estrutural proposta pelo DNER (1979) diz respeito à análise das deflexões de projeto, que não podem superar a deflexão estabelecida como admissível. Essa análise é feita em conjunto com a análise do raio de curvatura da bacia deflectométrica, que deve ser superior a 100 m, caso contrário indicará que o pavimento atingiu a fase de fadiga e é necessária sua reconstrução.

DNIT (2010) é baseado na metodologia da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e estabelece uma série de procedimentos que devem ser empregados para calibrar e controlar o FWD. DNER (1996) indica o processo a ser adotado com o fim de obter as deflexões recuperáveis pelo FWD; a metodologia compõe os ajustes e a calibração do aparelho, além das localizações das estações de trabalho e as etapas que devem ser cumpridas durante o ensaio.

De acordo com Shahin (2005), a deflexão máxima aponta a maneira como o pavimento por completo se comporta diante do efeito de uma carga, mas não como as camadas individuais do pavimento reagem à fadiga ou deformações permanentes. Por esse motivo, a análise da bacia de deformação é necessária, pois dois pavimentos distintos podem apresentar as mesmas deflexões máximas, porém distintas capacidades de dissipação da carga, de maneira que pavimentos com melhor capacidade apresentarão raio maior da bacia de deformações.

Andrade *et al.* (2016) realizaram ensaios utilizando o FWD em um trecho experimental composto por diferentes pavimentos, durante o período de um ano e meio. Por meio do estudo concluíram que o uso da bacia deflectométrica é um critério adequado de avaliação da estrutura de um pavimento, no entanto alguns parâmetros avaliados necessitam de calibração para serem utilizados em pavimentos brasileiros. Além disso, os autores concluíram que os pavimentos asfálticos apresentaram rigidez inadequada para tráfego de veículos comerciais, o que proporcionou fadiga precoce na camada de revestimento, apenas alguns meses após sua implantação.

3. MÉTODO DE PESQUISA

As análises deste estudo dizem respeito a uma determinada rodovia estadual de São Paulo, com solução única de reconstrução, desde o reforço do subleito, em todo o trecho, e se referem aos anos de 2016 e 2019. As análises foram feitas em 24 km nas duas faixas de tráfego com base nos resultados de deflexões recuperáveis obtidas pelo FWD nos sentidos norte e sul. O equipamento utilizado foi o modelo KUAB FWD 50, que permite a leitura das deformações recuperáveis em sete pontos.

Antes da reconstrução, o pavimento era composto por base em solo-brita na maioria do trecho, com alguns pontos em solo-cimento, de espessuras variáveis. A reconstrução contemplou a execução de base em solo-brita tratado com cimento (teor de 10%), reforço com material reciclado do próprio pavimento e revestimento em concreto asfáltico. As espessuras antes e após a reabilitação do pavimento estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1: Detalhamento das camadas do pavimento

| Antes da intervenção (2016) | | Depois da intervenção (2019) | |
|-----------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|
| Camada do pavimento | Espessura (cm) | Camada do pavimento | Espessura (cm) |
| Concreto asfáltico | Entre 3 e 12 | Concreto Asfáltico | 12,5 |
| Solo-Brita e Solo-Cimento | Entre 10 e 30 | Solo-Brita tratado com cimento | 18 |
| Reforço | Entre 20 e 70 | Reforço | 20 |
| Subleito (CBR>8%) | - | Subleito (CBR>8%) | - |

Inicialmente os dados de deflexão máxima e deflexão a 25 cm do centro da carga foram tabulados e calcularam-se os raios de curvatura para cada ponto. Neste artigo cada faixa de tráfego foi estudada isoladamente. Procedeu-se, então, a divisão do trecho em segmentos homogêneos, que possibilitam a melhor análise e qualificação da rodovia, visto que cada segmento é dividido de maneira que se concentre as mesmas características. De acordo com o DNER (1979), a divisão dos segmentos deve partir de alguns pré-requisitos; comprimento mínimo de 400 m e máximo de 2000 m. O critério de divisão dos segmentos homogêneos foi estabelecido pelo DNIT (2006), que segue o método das diferenças acumuladas da AASHTO.

Após a divisão dos segmentos homogêneos obteve-se as deflexões características e deflexões de projeto, segundo a análise estatística das diferenças recuperáveis da DNER (1979). Aqui utilizou-se como fator de correção sazonal o valor 1,00, que indica medições realizadas em estação chuvosa. Ainda seguindo DNER (1979) calculou-se a deflexão admissível do pavimento, por meio do número N cujo valor é $8,9 \times 10^6$ e comparou-se cada faixa analisada com o valor admissível, além disso, calculou-se o raio de cada segmento, de maneira que optou-se pela média dos valores correspondentes às deflexões máximas que não foram eliminadas pela análise estatística. Por fim, realizou-se a comparação dos resultados, entre os dois anos, 2016 e 2019, com apoio de gráficos, além de uma análise descritiva das variáveis com uso da estatística, de maneira que foi verificada a tendência central e a dispersão.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foram analisadas duas faixas de tráfego separadamente que contemplam dois anos de estudo (2016 e 2019) do trecho em questão, que contém duas faixas de tráfego nas quais as medições foram realizadas em dois sentidos, norte e sul. Para cada faixa estudada foi realizada a divisão do trecho em segmentos homogêneos, obtendo-se um total de 114 em 2016 e 124 em 2019. A quantidade de segmentos é detalhada na Tabela 2.

Tabela 2: Segmentos homogêneos analisados

| Ano | Faixa | Sentido da medição | Quantidade de segmentos |
|------|---------|--------------------|-------------------------|
| 2016 | Interna | Norte | 24 |
| | | Sul | 25 |
| | Externa | Norte | 39 |
| | | Sul | 26 |
| 2019 | Interna | Norte | 36 |
| | | Sul | 30 |
| | Externa | Norte | 33 |
| | | Sul | 25 |

Após a divisão dos segmentos homogêneos foi possível efetuar a análise estatística das deflexões recuperáveis, da qual pode-se obter as deflexões características dos segmentos em 10^{-2} mm (e por consequência as deflexões de projeto) e os raios de curvatura da bacia de deflexão. Nos subitens a seguir essa análise é melhor detalhada.

4.1 Deflexões de projeto

Realizou-se o comparativo entre as deflexões de projeto calculadas para os anos de 2016 e 2019, correspondente à Faixa Interna no sentido norte das medições, bem como a deflexão admissível para o pavimento, cujo valor obtido é $61,22 \times 10^{-2}$ mm. Por meio da Figura 1 pode-se perceber que 45,4% do trecho encontrava-se com deflexões de projeto acima da admissível em 2016; em 2019 nenhum segmento homogêneo apresentou deflexões de projeto superiores a admitida. Percebe-se, portanto, a diferença entre um pavimento com sua estrutura comprometida (2016) e um pavimento reconstruído (2019).

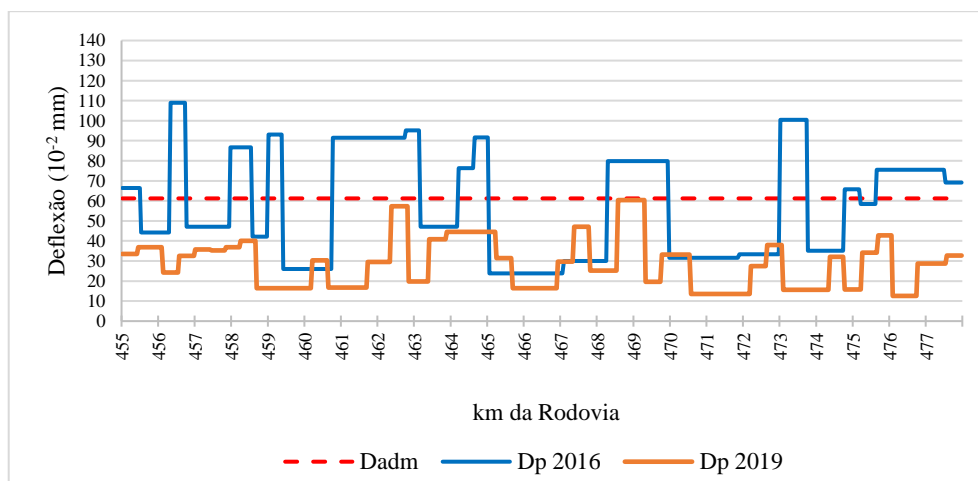


Figura 1: Deflexões de projeto da Faixa Interna (Norte)

Efetuiu-se o comparativo entre as deflexões de projeto calculadas para os anos de 2016 e 2019, correspondente à Faixa Externa no sentido norte, assim como a deflexão admissível. Por meio da Figura 2 é possível visualizar que 96,8% do trecho encontrava-se com deflexões de projeto acima da admissível em 2016. Em 2019, diferente da faixa analisada anteriormente, foi possível observar que 7,2% dos trechos apresentou deflexões superiores as admissíveis, mesmo com a reconstrução total do pavimento.

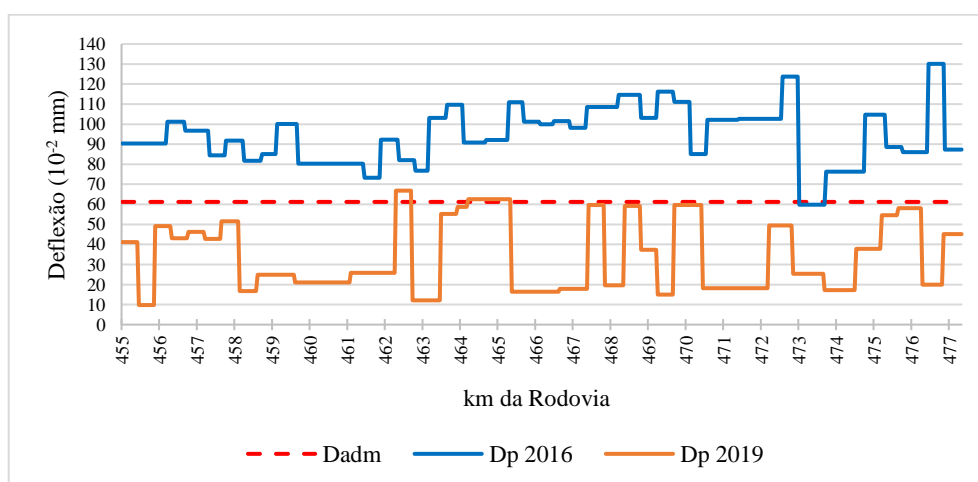


Figura 2: Deflexões de projeto da Faixa Externa (Norte)

Pode-se perceber que essa faixa apresenta deflexões maiores em ambos os anos de medição, o que pode indicar problemas pontuais no segmento analisado, possivelmente relacionado a

capacidade de suporte do subleito e a distribuição do volume de tráfego. Essa mudança gera no contexto dos Sistemas de Gerência de Pavimentos um alerta quanto a problemas estruturais precoces devido aos resultados das deflexões referentes ao ano de 2019, em que alguns segmentos apresentam valores muito próximos do valor admissível e em outros até maiores.

Analisou-se também o comparativo entre as deflexões de projeto calculadas para os anos de 2016 e 2019, correspondente à Faixa Interna no sentido sul das medições, assim como a deflexão admissível para o pavimento. Por meio da Figura 3 é possível visualizar que 44,1% do trecho encontrava-se com deflexões de projeto acima da admissível em 2016. É possível observar, também, que todo o trecho se encontra abaixo da deflexão admissível, em 2019.

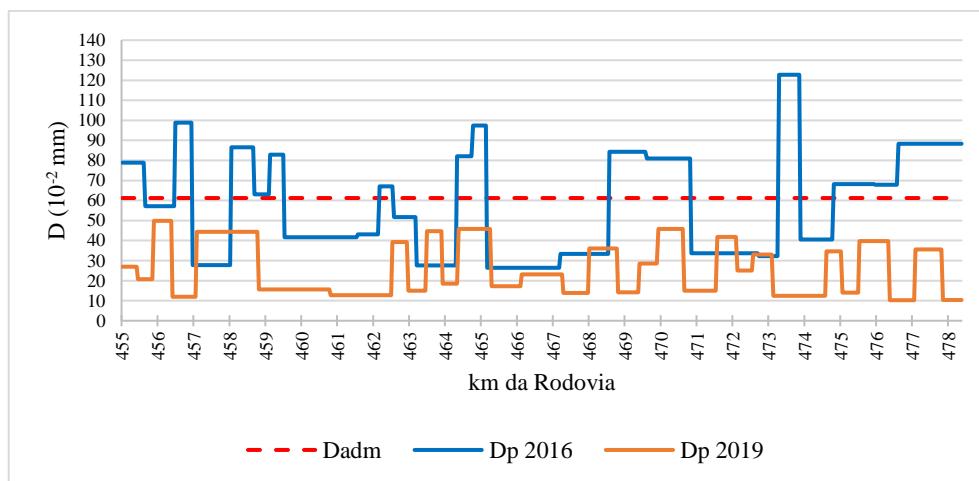


Figura 3: Deflexões de projeto da Faixa Interna (Sul)

Efetuiu-se o comparativo entre as deflexões de projeto calculadas para os anos de 2016 e 2019, correspondente à Faixa Externa no sentido sul, assim como a deflexão admissível. Por meio da Figura 4 é possível visualizar que 94,96% do trecho encontrava-se com deflexões de projeto acima da admissível em 2016. Em 2019 é possível visualizar que existem dois segmentos com deflexões de projeto acima da admissível, o que representa 5,46% do trecho. É possível notar o mesmo problema precoce quanto a altas deflexões nessa faixa do pavimento reconstruído, agora em sentido diferente da medição.

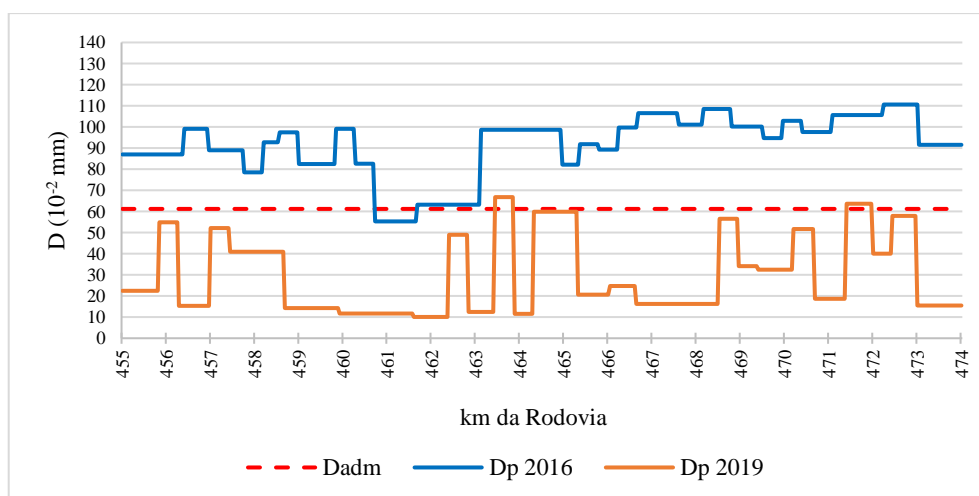


Figura 4: Deflexões de projeto da Faixa Externa (Sul)

Realizou-se ainda uma análise descritiva da variável deflexão de projeto, composta pela avaliação da tendência central e da dispersão, de maneira que foi feita uma comparação entre as duas faixas nos dois anos de medição e nos dois sentidos. Por meio da Tabela 3 e da Tabela 4 é possível observar os resultados da análise.

Tabela 3: Resultados da análise de tendência central

| Faixa | Interna-Norte | | Externa-Norte | | Interna-Sul | | Externa-Sul | | |
|------------------------------|---------------|--------|---------------|---------|-------------|---------|-------------|--------|-------|
| | Ano | 2016 | 2019 | 2016 | 2019 | 2016 | 2019 | 2016 | 2019 |
| Média (10^{-2} mm) | | 57,21 | 28,64 | 94,45 | 34,01 | 56,86 | 25,49 | 91,54 | 29,69 |
| Valor Mínimo (10^{-2} mm) | | 23,82 | 12,57 | 59,8279 | 9,75 | 26,4167 | 10,2487 | 55,29 | 10,09 |
| Mediana (10^{-2} mm) | | 47,12 | 29,58 | 92,31 | 25,83 | 51,74 | 20,6693 | 97,50 | 20,57 |
| Valor Máximo (10^{-2} mm) | | 108,95 | 60,39 | 130,11 | 66,84 | 122,73 | 49,8397 | 110,62 | 66,80 |

Mediante a análise da tendência central é possível observar a grande diferença entre as médias das deflexões do trecho dos dois anos, para ambas as faixas, na qual a faixa externa no ano de 2016 apresentou média relativamente maior que a interna, no mesmo ano, em ambos os sentidos de medição. A mediana de ambos os anos e faixas tem valor muito próximo da média, o que indica simetria dos valores, de maneira que as variações ocorrem de forma muito semelhante tanto para valores abaixo da média quanto para valores acima. A faixa externa em 2019 apresentou uma diferença significativa nesse aspecto, principalmente no sentido norte, quando comparada a interna, isso indica que há uma concentração considerável de valores acima da mediana.

É possível ainda perceber uma diferença entre os valores máximos e mínimos de deflexão nas quatro análises, em que apenas a faixa interna em 2019 apresentava valor máximo abaixo da deflexão admissível, com a medição no sentido norte bem próxima desse valor. Além disso, os valores mínimos de deflexão em 2016 na faixa externa estavam muito próximos da deflexão admissível. Todas essas observações apontam maiores deflexões na faixa externa, mesmo após a reconstrução do pavimento.

Por meio da análise da dispersão (Tabela 4), pode-se verificar com o coeficiente de variação que em 2016 a faixa externa se encontrava com grande concentração de deflexões altas, fato indicado pela pequena porcentagem, que mostra que os valores não variaram muito em relação à média, que estava bem acima da deflexão admissível. Essa concentração de valores elevados já pode ser percebida anteriormente com a análise do valor mínimo, que já era bem alarmante. Além disso, pode-se perceber que há grande variação nos valores de deflexão após a intervenção, o que pode ser devido a alguns segmentos ainda estarem em fase de consolidação e outros já terem atingido a fase elástica, visto que a obra foi concluída pouco tempo antes das medições, mas é necessária atenção quanto a essa persistência em altas deflexões na faixa externa, quando comparadas a interna, o que já existia em 2016.

Tabela 4: Resultados da análise da dispersão

| Faixa | Interna-Norte | | Externa-Norte | | Interna-Sul | | Externa-Sul | | |
|---|---------------|--------|---------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|--------|
| | Ano | 2016 | 2019 | 2016 | 2019 | 2016 | 2019 | 2016 | 2019 |
| Variância (10^{-4} mm ²) | | 703,81 | 156,16 | 201,90 | 311,22 | 676,38 | 173,05 | 208,93 | 339,83 |
| Desvio Padrão (10^{-2} mm) | | 26,53 | 12,50 | 14,21 | 17,64 | 26,01 | 13,15 | 14,46 | 18,43 |
| Coeficiente de Variação (%) | | 46,37 | 43,63 | 15,04 | 51,87 | 45,74 | 51,60 | 15,79 | 62,10 |

A Tabela 5 apresenta um resumo das proporções de cada faixa cujos valores de deflexão estavam acima do admissível. Por meio dela, fica claro a diferença entre a Faixa Interna e a

Faixa Externa, de maneira que em 2016 quase 100% do trecho encontrava-se com deflexões de projeto muito altas, e os valores elevados já aparecem em 2019 para a Faixa Externa.

Tabela 5: Resumo das proporções de deflexões de projeto acima da admissível

| Faixa | Sentido | % acima da deflexão admissível em 2016 | % acima da deflexão admissível em 2019 |
|---------|---------|--|--|
| Interna | Norte | 45,40 | 0 |
| | Sul | 44,10 | 0 |
| Externa | Norte | 96,80 | 7,20 |
| | Sul | 94,96 | 5,43 |

4.2 Raios de curvatura da bacia deflectométrica

A Figura 5 apresenta os raios de curvatura referentes a Faixa Interna no sentido norte, em 2016 e 2019. É possível visualizar que 13,04% do trecho cujas medições foram realizadas em 2016 apresentou raio de curvatura inferior a 100 m, valor indicado como favorável à fase de fadiga do pavimento.

Os raios críticos variaram de 81,23 m a 95,92 m, com deflexões de projeto entre $95,2 \times 10^{-2}$ mm a $88,8 \times 10^{-2}$ mm. Percebe-se que os valores das deflexões relativos aos raios estão acima da deflexão admissível. Os resultados apresentados para o ano de 2019 mostram que o pavimento tem adequada capacidade estrutural, visto que todos os raios estão acima de 100 m. Esse fator associado às deflexões analisadas anteriormente para essa faixa, abaixo da admissível, mostram que a reconstrução proporcionou a recuperação estrutural.

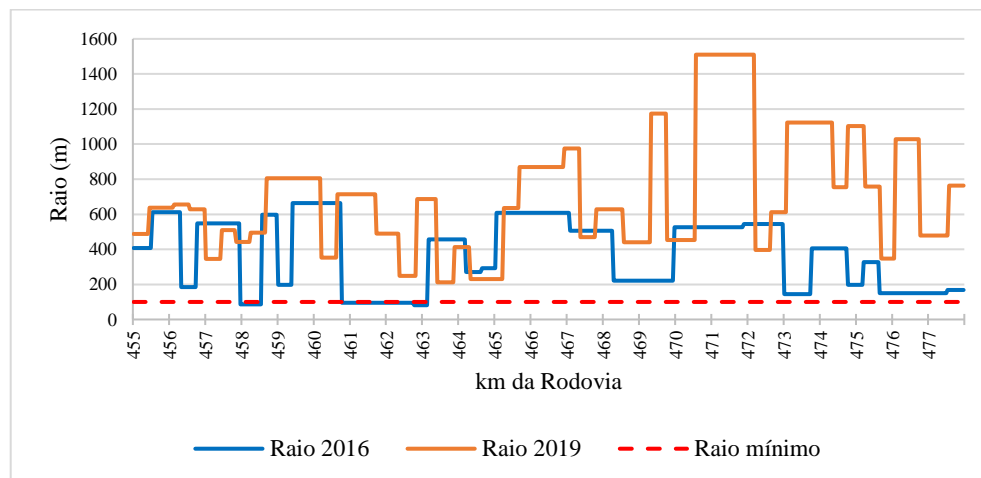


Figura 5: Raios de curvatura da bacia deflectométrica da Faixa Interna (Norte)

Na Figura 6 são representados os raios de curvatura referentes a Faixa Externa no sentido norte e que dizem respeito as medições de 2016 e 2019. É possível visualizar que, em 2016, 83,72% do trecho apresenta raio de curvatura inferior a 100 m.

Percebe-se que 13,06% do trecho não apresentou raio inferior a 100 m, mas teve valores muito próximos a esse limite. Os resultados apresentados para o ano de 2019 mostram que o pavimento tem adequada capacidade estrutural, visto que todos os raios estão acima de 100 m.

Por meio dos raios de curvatura pode-se perceber que essa faixa apresenta menor capacidade de dissipação das cargas no pavimento, visto que apresentou valores menores de raio quando

comparada a Faixa Interna, inclusive no ano de 2019. Embora nenhum valor de raio no ano de 2019 apresente valor menor que 100 m, é importante ressaltar que a menor capacidade de dissipação pode levar o pavimento a problemas estruturais precoces.

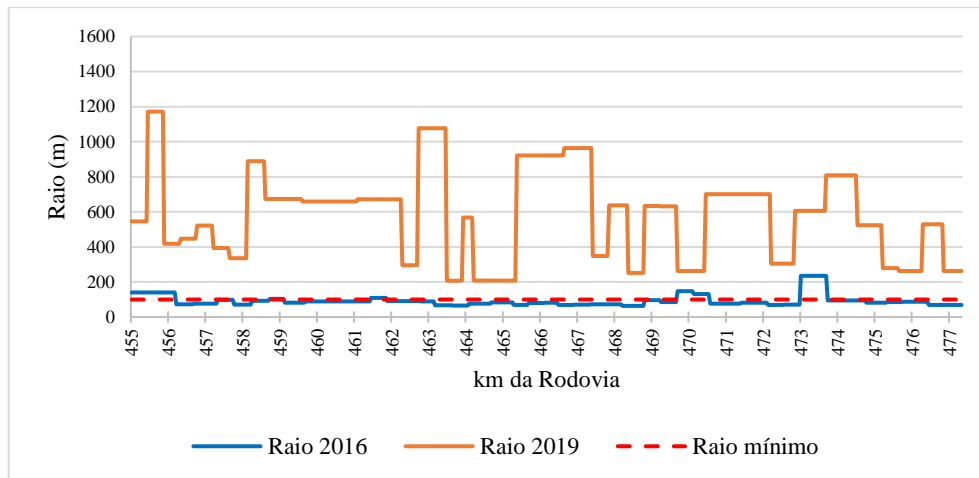


Figura 6: Raios de curvatura da bacia deflectométrica da Faixa Externa (Norte)

A Figura 7 apresenta os raios de curvatura referentes a Faixa Interna no sentido sul em 2016 e 2019. É possível visualizar que 2,6% do trecho em 2016 apresentou raio de curvatura inferior a 100 m. Essa porcentagem equivale a um segmento homogêneo, cujo valor de raio foi 52,63 m e a deflexão de projeto $122,73 \times 10^{-2}$ mm, valor que é quase o dobro da deflexão admissível.

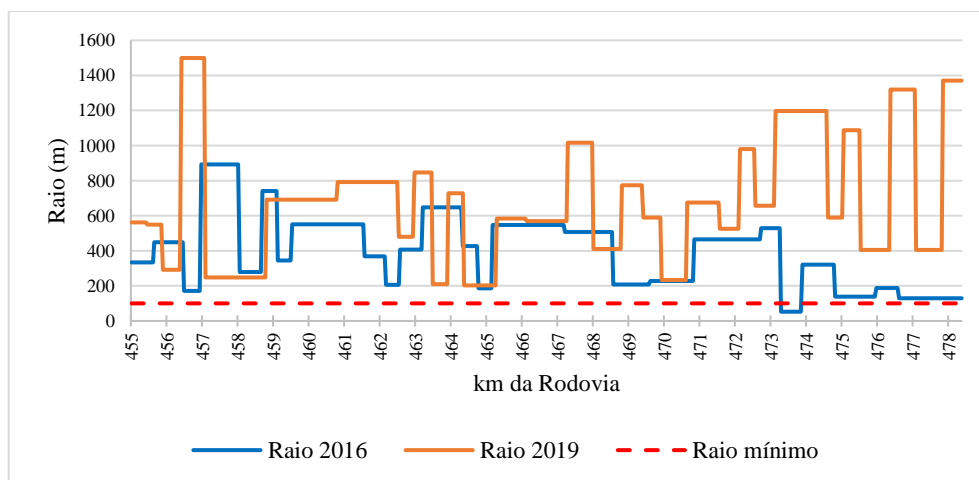


Figura 7: Raios de curvatura da bacia deflectométrica da Faixa Interna (Sul)

Os resultados apresentados para o ano de 2019 mostram que o trecho tem adequada capacidade estrutural, visto que todos os raios estão acima de 100 m. Esse fator em conjunto ao de que todas as deflexões de projeto desta faixa se mostraram inferiores as admissíveis, confirmam o que foi observado no sentido norte da medição.

A Figura 8 apresenta os raios de curvatura referentes a Faixa Externa no sentido sul e que dizem respeito as medições de 2016 e 2019. Por meio da Figura 8 é possível visualizar que 71,22% do trecho apresenta raio de curvatura inferior a 100 m.

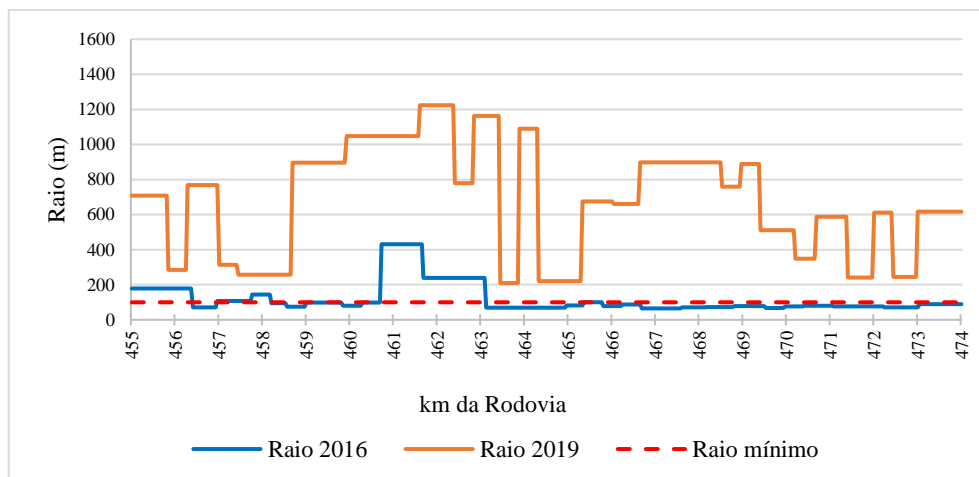


Figura 8: Raios de curvatura da bacia deflectométrica da Faixa Externa (Sul)

O segmento com maior raio superior a 100 m apresentou valor igual a 430,93 m e deflexão de projeto igual a $55,29 \times 10^{-2}$ mm, menor do que a deflexão admissível. Novamente observa-se que mesmo aqueles segmentos que apresentaram valores de raio maiores que 100 m estavam muito próximos a esse limite, o que pode indicar um comprometimento da estrutura do pavimento pela fadiga, valor que equivale a 16,18% do trecho.

Os resultados apresentados para o ano de 2019 mostram que o trecho tem adequada capacidade estrutural, visto que todos os raios estão acima de 100 m. Isso confirma a menor capacidade de dissipação das cargas, que foi observado anteriormente e indica que as camadas do pavimento têm resistência que propicia a fadiga causada pela repetição das cargas provindas do tráfego de veículos.

Uma análise descritiva da variável raio da bacia deflectométrica foi realizada, para que seja feito o comparativo entre as faixas, anos e sentidos de medição. Os resultados são apresentados na Tabela 6 e na Tabela 7.

Tabela 6: Resultados da análise de tendência central

| Faixa | Interna-Norte | | Externa-Norte | | Interna-Sul | | Externa-Sul | |
|------------------|---------------|---------|---------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
| Ano | 2016 | 2019 | 2016 | 2019 | 2016 | 2019 | 2016 | 2019 |
| Média (m) | 374,92 | 703,96 | 92,03 | 580,45 | 396,06 | 678,09 | 118,60 | 677,37 |
| Valor Mínimo (m) | 81,23 | 211,99 | 63,64 | 207,33 | 52,63 | 202,55 | 64,97 | 210,02 |
| Mediana (m) | 407,99 | 636,84 | 83,52 | 631,93 | 426,62 | 656,67 | 80,58 | 691,56 |
| Valor Máximo (m) | 663,81 | 1510,15 | 235,11 | 1171,34 | 892,46 | 1499,18 | 430,93 | 1223,58 |

Por meio da análise de tendência central (Tabela 6) pode-se observar a simetria citada anteriormente para a deflexão está presente no raio para as faixas externas em 2016. Isso indica que há uma quantidade de valores aproximadamente proporcional acima e abaixo da média. Esse indicador é preocupante visto que os raios máximos não são muito altos, principalmente na medição com sentido norte. Os dados referentes a 2019 mostram que o trecho apresenta capacidade estrutural adequada, visto que os valores mínimos estão superiores a 100 m e os máximos são bastante elevados.

Tabela 7: Resultados da análise de dispersão

| Faixa | Interna-Norte | | Externa-Norte | | Interna-Sul | | Externa-Sul | | |
|------------------------------|---------------|----------|---------------|---------|-------------|----------|-------------|---------|----------|
| | Ano | 2016 | 2019 | 2016 | 2019 | 2016 | 2019 | 2016 | 2019 |
| Variância (m ²) | | 40002,61 | 112240,94 | 1073,56 | 64075,38 | 41698,52 | 118145,96 | 7573,89 | 96002,78 |
| Desvio Padrão (m) | | 200,01 | 335,02 | 32,77 | 253,13 | 204,20 | 343,72 | 87,03 | 309,84 |
| Coefficiente de Variação (%) | | 53,35 | 47,59 | 35,60 | 43,61 | 51,56 | 50,69 | 73,38 | 45,74 |

Por meio da análise da dispersão (Tabela 7), pode-se perceber que todos os resultados são de coeficientes de variação muito elevadas. Pode-se observar que a faixa externa em 2016, sentido norte, apresentou menor coeficiente de variação, o que confirma o citado anteriormente, que há concentração de valores muito pequenos de raio nessa faixa. No entanto, devido a um segmento com raio superior a 400 m, a faixa sul apresentou variação maior, mas vale ressaltar que todo o restante do trecho se encontrava abaixo ou muito próximo dos 100 m. Além disso, vale destacar que a faixa externa em 2016 apresentou desvio padrão muito menor que as demais, o que enfatiza novamente essa concentração de pequenos valores, agora visto em ambos os sentidos da medição.

A Tabela 8 apresenta um resumo percentual de cada faixa cujos valores de raio da bacia deflectométrica estavam abaixo de 100 m. Verifica-se a diferença entre a Faixa Interna e a Faixa Externa, de maneira que em 2016 em torno de 2/3 do trecho encontrava-se com raios abaixo de 100 m na Faixa Interna.

Tabela 8: Resumo percentual de raios da bacia deflectométrica abaixo de 100 m.

| Faixa | Sentido | % abaixo de 100 m | |
|---------|---------|-------------------|---------|
| | | em 2016 | em 2019 |
| Interna | Norte | 13,04 | 0 |
| | Sul | 2,60 | 0 |
| Externa | Norte | 83,72 | 0 |
| | Sul | 71,22 | 0 |

5. CONCLUSÕES

Por meio deste estudo pode-se concluir que o trecho estudado não apresentava adequadas condições estruturais em 2016, fator indicado pelas deflexões de projeto, superiores à deflexão admissível, e raios de curvatura inferiores ao limite estabelecido. Além disso, pode-se destacar a execução da obra de reconstrução, com solução única para a rodovia estudada.

A Faixa Externa do trecho mostrou ter menor capacidade de suporte do subleito, visto que apresentou maiores deflexões quando comparada a Faixa Interna, além de menor capacidade de dissipar as cargas de solicitação, fator indicado pelos valores bem menores de raio de curvatura da bacia deflectométrica e observado em ambos os sentidos de medição, norte e sul. Pode-se inferir que esse problema está relacionado a distribuição do tráfego de veículos, que provavelmente tem maior concentração de veículos pesados na Faixa Externa. Isso pode ser observado inclusive no pavimento em 2019, de maneira que alguns segmentos homogêneos apresentaram resultados de raio bem pequenos.

Ainda que a obra tenha sido finalizada pouco tempo antes das medições, é difícil sustentar a

hipótese de que os altos valores de deflexão sejam resultado de uma fase de consolidação que ainda não foi concluída, visto que esse era um problema muito aparente em 2016, pois a faixa externa teve o dobro de segmentos com problemas. O que pode de fato ter influenciado no aparecimento de grandes deflexões em um trecho recém reconstruído é que a solução foi única, muito embora verifica-se que as faixas tinham solicitação de tráfego diferente, indicando um maior volume de veículos comerciais na Faixa Externa, o que tem influência sobre o seu desempenho estrutural. Isso indica que os segmentos que apresentaram grandes deflexões em 2019, pós reconstrução, podem precisar de atenção mais constante quanto a problemas estruturais precoces, visto que os menores raios podem indicar ineficiência em resistir as cargas do tráfego de veículos.

De maneira geral, pode-se concluir que o pavimento em 2019, encontra-se adequado no que diz respeito a sua capacidade estrutural. No entanto, a Faixa Externa necessita de acompanhamento especial do Sistema de Gerência de Pavimentos, com medições constantes da deflexão, para que, quando necessária, outra intervenção, possa ser realizada em momento oportuno de forma a diminuir gastos futuros e manter a segurança e o conforto dos usuários da rodovia.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, L. R.; K. L. Vasconcelos e L. L. B. Bernucci (2016) Avaliação do comportamento estrutural de pavimentos por meio de adoção de parâmetros de bacia deflectométrica. *Anais do XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro.
- Bernucci, L. B.; L. Motta; J. Ceratti e J. Soares. (2010) Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Editora Abeda, Rio de Janeiro.
- CNT (2019) Pesquisa CNT de rodovias 2019: relatório gerencial. Confederação Nacional do Transporte, Brasília, DF.
- DNER (1979) PRO 011 – Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis – Procedimento. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER (1996) PRO 273 – Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)” – Procedimento. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNIT (2006) *Manual de pavimentação*. Departamento Nacional De Infraestrutura de Transportes. Brasília.
- DNIT (2010) PRO 132 – Pavimentos – Calibração da célula de carga e de sensores de deflexão dos deflectômetros do tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)” – Procedimento. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasília.
- Espíndola, A. C.; T. G. M. Ciríaco; L. R. Valoura; P. G. P. S. Fernandes e M. A. O. Teixeira (2017) Diagnóstico da condição do pavimento das rodovias federais do estado de Alagoas. *Anais do XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Recife, v. 1, p. 189–200.
- Marcos, V.; S. Fontul; M. L. Antunes e M. Solla (2017) Evaluation of a highway pavement using non-destructive tests: Falling Weight Deflectometer and Ground Penetrating Radar. *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 1164-1172.
- Noureldin, A. S.; K. Zhu; S. Li e D. Harris (2003) Network pavement evaluation with falling-weight deflectometer and ground-penetrating radar. *Transportation research record*, v. 1860, n. 1, p. 90-99.
- Shahin, M. Y. (2005) *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots*. Editora Springer. Nova Iorque.
- Xu, B.; S. R. Ranjithan e Y. R. Kim (2002) New relationships between falling weight deflectometer deflections and asphalt pavement layer condition indicators. *Transportation research record*, v. 1806, n. 1, p. 48-56.

Renata de Souza Sales (renatasales@det.ufc.br)

Francisco Heber Lacerda de Oliveira (heber@det.ufc.br)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará

R. Prof. Armando Farias, 703 - Pici, Fortaleza - CE, Brasil